

УДК 621.5:519.6

А. А. Андрижиевский¹, А. Г. Трифонов², Л. С. Кулик²¹Белорусский государственный технологический университет²ГНУ «Объединенный институт энергетических и ядерных исследований – Сосны» Национальная академия наук Беларуси**МОДЕЛИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ ТЕРМОКОНВЕКТИВНЫХ ПОТОКОВ
В СИСТЕМЕ ПАССИВНОГО ОТВОДА ТЕПЛА АЭС**

В рамках формализованных шаблонов программного пакета COMSOL Multiphysics выполнена адаптация применительно к описанию структуры газожидкостных потоков разработанного ранее модельного аналога системы пассивного отвода тепла СПОТ от защитной оболочки АЭС.

Представленная в [1] замкнутая система уравнений сохранения дополнена уравнением количества движения для двухфазной смеси в каналах нижнего трубчатого теплообменника СПОТ в допущениях модели гомогенного двухфазного потока (модель смешения). В рамках выполненных вычислительных экспериментов решалась нестационарная задача на установление.

По результатам данной серии экспериментов можно сделать вывод, что наиболее упорядоченная структура двухфазных потоков формируется в паровоздушном объеме над зеркалом испарения верхнего бака отвода тепла СПОТ. Для теплообменных каналов нижнего теплообменника СПОТ характерна менее упорядоченная и устойчивая структура, что связано с периодическим возникновением условий динамической неустойчивости двухфазного потока.

Представленный в работе модельный аналог процессов тепломассопереноса в системах пассивного отвода тепла от защитной оболочки АЭС и результаты данного исследования могут быть использованы для проведения анализа безопасности работы белорусской АЭС.

Ключевые слова: аварийные выбросы АЭС, процессы переноса, моделирование, вычислительный шаблон.

A. A. Andrizhievsky¹, A. G. Trifonov², L. S. Kulik²¹Belarusian State Technological University²SSI “Joint Institute for Power and Nuclear Research – Sosny”
of the National Academy of Sciences of Belarus**MODELLING OF STRUCTURE OF THERMAL CONVECTION STREAMS
IN NUCLEAR POWER PLANT CONTAINMENT**

In the framework of formal templates software package COMSOL Multiphysics performed adaptation in relation to the description of the structure of gas-liquid flows developed earlier model analog passive heat removal system SPOT of nuclear power plant containment.

Presented in [1] a closed system of equations equation is complemented by conservation of momentum for a two-phase mixture in the canals of the lower tubular heat exchanger spot in assumptions model homogeneous two-phase flow (model). Within the framework of computational experiments performed solved problem on non-stationary setting.

Based on the results of this series of experiments we can conclude that the most orderly structure of biphasic streams formed in the vapour above the mirror volume evaporation heat tank top SPOT. For heat exchange channels lower exchanger SPOT characterized less orderly and stable structure that is associated with the periodic emergence of dynamic instability conditions.

Submitted work model of heat and mass transfer processes in analog systems, passive heat removal from the containment of nuclear power plants and the results of this study can be used to perform a security analysis of the work of the Belarusian nuclear power plant.

Key words: Emergency emissions of NPP, transfer processes; modeling, computing template.

Введение. Как отмечалось в работе [1], приоритетность и надежность пассивных средств в обеспечении безопасности АЭС в случае аварийных ситуаций в значительной степени определяется их функционированием без потребления электроэнергии, отсутствием необходимости применения управляющих сигналов от контрольно-измерительной аппарату-

ры и, соответственно, необходимости вмешательства эксплуатационного персонала.

Функционально система пассивного отвода тепла СПОТ от защитной оболочки АЭС обеспечивает длительный (не менее 24 часов) отвод тепла из объема защитной оболочки при запроектных авариях, связанных с потерей теплоносителя первого контура, полным обесточиванием и

отказом спринклерной системы. СПОТ (рис. 1) включает в себя теплообменники-конденсаторы, размещенные в верхней части объема контеймента и связанные трубопроводами с баками аварийного отвода тепла (БАОТ) [2, 3].

Исследование пассивных систем с естественным охлаждением требует совместного моделирования следующих нестационарных процессов:

- конденсации пара из парогазовой смеси под защитной оболочкой на внешней теплообменной поверхности трубных пучков теплообменников-конденсаторов СПОТ;
- тепломассообменных процессов в контейнменте защитной оболочки;
- режимов кипения на внутренних поверхностях трубных пучков теплообменников аварийного расхолаживания СПОТ 30, возможности возникновения режима пленочного кипения;
- перемешивания охлаждающей воды в баке аварийного охлаждения при отводе парогазовой смеси СПОТ, связанное с термоконвекцией и конденсацией;
- устойчивости работы контуров охлаждения СПОТ.

Модель описания процессов переноса.

В данной работе в рамках формализованных шаблонов программного пакета COMSOL Multiphysics выполнена адаптация применительно к описанию структуры газожидкостных потоков, разработанного ранее модельного аналога системы пассивного отвода тепла СПОТ от защитной оболочки АЭС [1].

Представленная в [1] замкнутая система уравнений сохранения дополнена уравнением количества движения для двухфазной смеси в каналах нижнего трубчатого теплообменника

СПОТ в допущениях модели гомогенного двухфазного потока (модель смешения):

$$\begin{aligned} \rho u_t + \rho(u \nabla) u = \\ = -\nabla p - \nabla(\rho c_d(1 - c_d)u_{slip}u_{slip}) + \\ + \nabla \tau_{Gm} + \rho g + F, \end{aligned}$$

где u – скорость, м/с; ρ – плотность, кг/м³; p – давление, Па; c_d – массовая доля дисперсной фазы, кг/кг; u_{slip} – скорость скольжения между фазами, м/с; τ_{Gm} – суммарные вязкостные и турбулентные напряжения, кг/(м · с²); g – сила тяжести, м/с²; F – внешняя объемная сила, Н/м³. Параметры смеси определяются через объемные доли непрерывной и дисперсной фаз.

Соотношение между скоростями жидкой и паровой фаз будет определяться как

$$u_d - u_c = u_{cd} = u_{slip} - \frac{D_{md}}{(1 - c_d)\phi_d} \nabla \phi_d,$$

где u_{slip} определяется как скорость скольжения фаз, м/с; D_{md} – коэффициент турбулентной диффузии, м²/с, учитывающий внешнюю диффузию вследствие турбулентных вихрей.

При не учете турбулентных эффектов D_{md} равен нулю.

В данном приближении плотности отдельных фаз, ρ_c и ρ_d , принимаются постоянными и, следовательно, уравнение неразрывности для смеси будет иметь вид

$$\begin{aligned} (\rho_c - \rho_d)[\nabla \phi_d ((1 - c_d)u_{slip} - \\ - D_m \nabla \phi_d) + \frac{m_{dc}}{\rho_d} + \rho_c \nabla u = 0. \end{aligned}$$

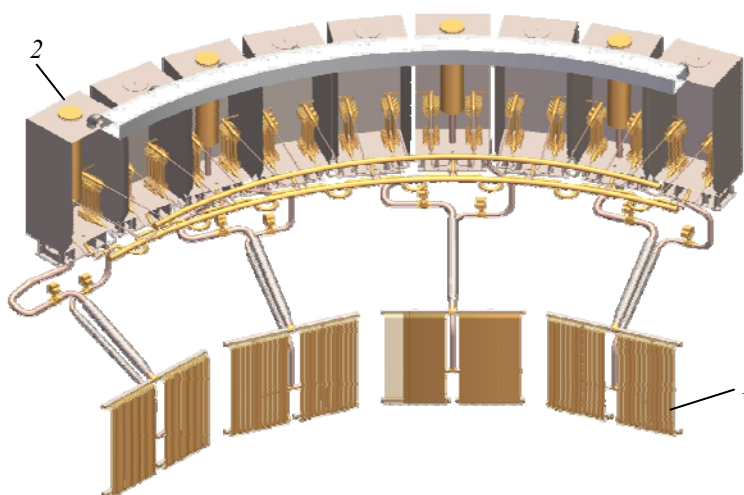


Рис. 1. Принципиальная схема системы

пассивного отвода тепла от защитной оболочки АЭС СПОТ:

- 1 – теплообменники-конденсаторы; 2 – бак аварийного отвода тепла (БАОТ)
 (количество каналов – 4; количество теплообменников-конденсаторов в канале – 4;
 поверхность теплообмена в канале не менее 300 м²;
 объем запаса воды БАОТ в канале – 538 т; мощность канала – 17–19 МВт)

Суммарный тепловой поток вследствие испарения с поверхности БАОТ в приближении метода приведенной пленки вблизи поверхности определялся, как и прежде, согласно представлений работ [4, 5] по соотношению

$$q_{sum} = \frac{Nu}{L} \left[\lambda_{mix} (T_{sf} - T_{\infty}) + D'' \rho_{mix} k \ln \left(\frac{(m_{mix} (1 - c''))_{\infty}}{(m_{mix} (1 - c''))_{sf}} \right) \right],$$

где Nu – число Нуссельта; L – характерный линейный масштаб процессов у поверхности; λ_{mix} – коэффициент теплопроводности паровоздушной смеси; T_{sf} – температура насыщения (у поверхности); T_{∞} – температура на удалении от поверхности; D'' – коэффициент турбулентной диффузии пара в воздухе; ρ_{mix} – плотность паровоздушной смеси; k – скрытая теплота парообразования; m_{mix} – масса паровоздушной смеси; c'' – концентрация пара над зеркалом испарения в БАОТ.

Результаты исследования. В рамках выполненных вычислительных экспериментов решалась нестационарная задача на установление. Для численного моделирования были выбраны:

- начальный период эксплуатации СПОТ 30 при выходе на квазистационарный – однофазный режим течения, поверхностное кипение;
- режим сформировавшейся структуры парогазовых потоков в элементах СПОТ. В на-

чальный момент температура принимается равной 293 К. При возникновении аварийной ситуации температура под куполом принимается равной 375 К. На границе теплопередающих поверхностей принято граничное условие 2-го рода.

В рамках выполненных вычислительных экспериментов решалась нестационарная задача на установление.

Результаты выполненных вычислительных экспериментов представлены на рис. 2–4.

На рис. 2 изображена структура парожидкостных потоков в баке аварийного отвода тепла БАОТ СПОТ.

На рис. 3 представлены функции тока и векторы скорости в нижнем теплообменнике-конденсаторе СПОТ.

По результатам данной серии экспериментов можно сделать вывод, что наиболее упорядоченная структура двухфазных потоков формируется в парожидкостном объеме верхнего бака отвода тепла СПОТ.

Для теплообменных каналов нижнего теплообменника-конденсатора СПОТ характерна менее упорядоченная и устойчивая структура, что связано с периодическим возникновением условий динамической неустойчивости двухфазного потока.

Рис. 4 иллюстрирует импульсный характер режима работы СПОТ в начальный момент аварийного сброса тепла под контеймент, характеризующийся формированием структуры парогазожидкостных потоков в верхнем баке аварийного отвода тепла и нижнем теплообменнике-конденсаторе СПОТ.

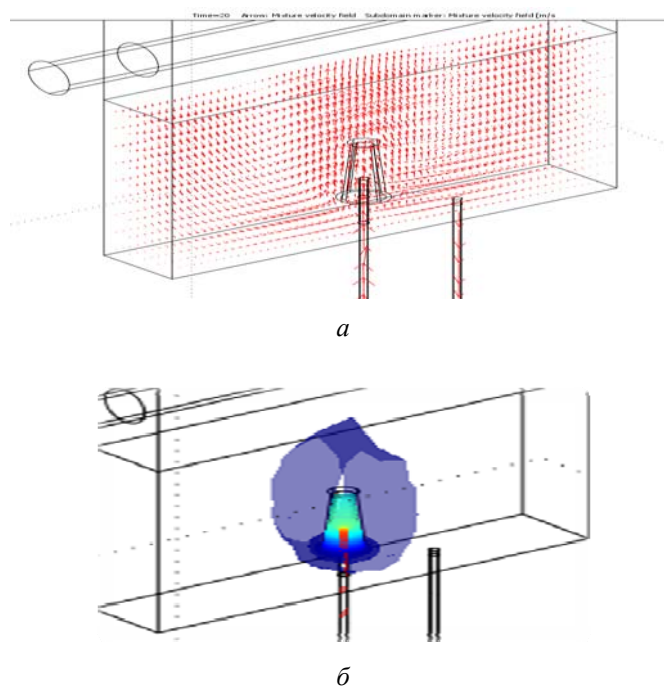


Рис. 3. Функции тока и векторы скорости в нижнем теплообменнике-конденсаторе СПОТ

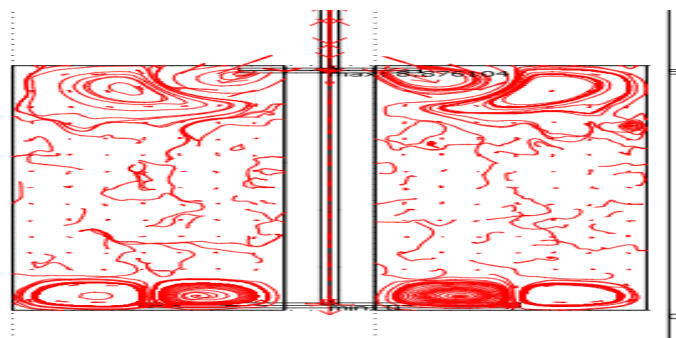


Рис. 3. Функции тока и векторы скорости в нижнем теплообменнике-конденсаторе СПОТ

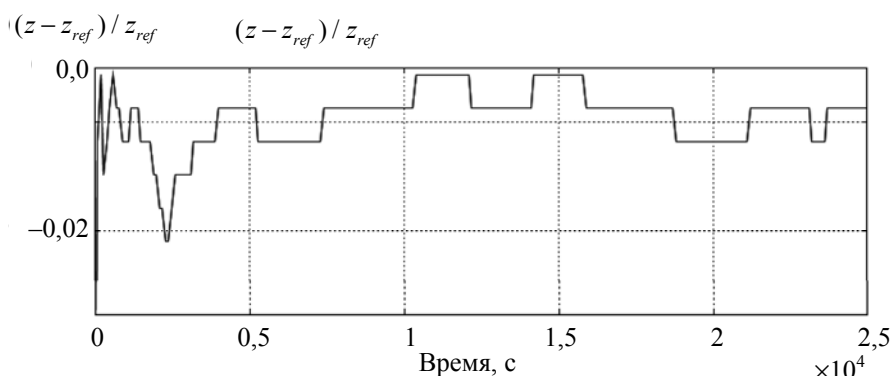


Рис. 4. Периодические изменения относительной плотности теплоносителя в средней части секции теплообменника-конденсатора СПОТ

На рис. 4 $(z - z_{ref}) / z_{ref}$ – фактор соотношения амплитуды колебаний плотности парогазовой смеси к ее осредненному для данной области значению $(z - z_{ref}) / z_{ref}$. Импульсный характер движения отмечается на всех режимах: от начального периода запуска до перехода в квазистационарный режим.

Наличие импульсного режима в работе СПОТ косвенно подтверждается результатами ряда экспериментальных исследований.

Так, в работах [2, 3] приведены опытные данные по изменению профилей температур и давлений в период выхода СПОТ на устойчивый режим работы. Данные зависимости носят асимптотический характер с переходом от импульсного к квазистационарному изменению указанных параметров.

В большей степени импульсный характер процессов переноса в начальные моменты работы СПОТ проявляется в профилях массовых скоростей в каналах теплообменника-конденсатора [1] и в объеме контейнента (рис. 5) [2, 3].

На рис. 5 $(z - z_{ref}) / z_{ref}$ – фактор соотношения амплитуды колебаний массовой скорости потока пара в объеме контейнента к ее осредненному для данной области значению.

Вместе с тем следует отметить, что согласно рис. 4, изменение плотности теплоносителя в средней части нижнего теплообменника-конденсатора носит устойчивый импульсный ха-

рактер и на квазистационарном режиме.

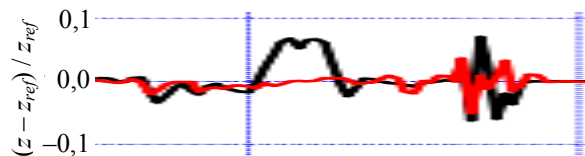


Рис. 5. Относительное изменение характерной массовой скорости пара высокого давления в объеме контейнента в двух контрольных точках в начальный момент работы СПОТ (до $6 \cdot 10^3$ с)

Поведение двухфазной рабочей среды в теплообменнике-конденсаторе в работах [2, 3] не изучалось и поэтому указанная особенность импульсного перестроения ее структуры нуждается в дополнительной интерпретации по результатам дальнейших исследований. С нашей точки зрения, импульсный характер изменения плотности потока в восходящей части теплообменника-конденсатора может быть связан с периодическим образованием паровой пробки на входе в объем верхнего бака отвода тепла СПОТ. Данный вывод частично подтверждается рис. 2, б.

Заключение. В результате проведения данной серии вычислительных экспериментов выявлен ряд особенностей формирования структуры термоконвективных потоков в системе

пассивного отвода тепла АЭС и, в частности, импульсный характер движения теплоносителя в конденсаторе-охладителе на всех стадиях выхода его работы на квазистационарный режим.

В целом, результаты данной серии вычислительных экспериментов свидетельствуют об их

физической непротиворечивости и согласованности с опытными данными.

Дальнейшее развитие представленной модели связано с сопряженным рассмотрением процессов переноса, как в каналах теплообменников-конденсаторов, так и в объеме контейнмента.

Литература

1. Андрижиевский, А. А., Трифонов А. Г., Кулик Л. С. Моделирование пассивной системы отвода тепла от защитной оболочки АЭС в режиме термоконвекции // Труды БГТУ. 2015. № 3: Химия и технология неорган. в-в. С. 140–144.
2. ЛАЭС II: обоснование пассивных систем безопасности / В. В. Безлепкин [и др.] // РОСЭНЕРГОАТОМ. 2008. № 6. С. 18–23.
3. Свириденко И. И. Показатели надежности автономной системы пассивного отвода теплоты ВВЭР на основе двухфазных термосифонов // Сборник научных трудов СНИЯЭиП. 2005. № 14. С. 14–25.
4. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Статистическая физика. Ч. 1. М.: Наука, 1964. 568 с.
5. Андрижиевский А. А., Михалевич А. А., Трифонов А. Г. Моделирование термоконвективных течений в динамических газожидкостных слоях водных охладителей // Доклады Академии наук Беларуси. 1995. Т. 39, № 3: Технические науки. С. 109–113.

References

1. Andrizhievsky A. A., Trifonov A. G., Kulik L. S. Simulation of passive heat removing from containment by thermoconvection. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], 2015, no. 3: Chemistry and Technology of Inorganic Substances, pp. 140–144 (in Russian).
2. Bezlepin V. V., Semashko S. Ye., Alekseev S. B., Vardanidze T. G., Petrov Yu. Yu. [and etc.]. LNPP II: support of passive safety systems. *ROSENERGOATOM* [RUSENERGYATOM], 2008, no. 2, pp. 18–23 (In Russian).
3. Sviridenko I. I. Reliability of passive heat dissipation system of PWR based on two-phase thermosyphons. *Sbornik nauchnykh trudov SNIYAEiP* [The collection of proceedings of the SNIUNEP], 2005, no. 14, pp. 14–25 (In Russian).
4. Landau L. D., Lifshits E. M. *Statisticheskaya fizika* [Statistical physics. Part 1]. Moscow, Nauka Publ., 1964. 568 p.
5. Andrizhievsky A. A., Mikhalevich A. A., Trifonov A. G. Modelling of thermal convective currents in gas-fluid dynamic layers of water cooler. *Doklady Akademii nauk Belarusi* [Reports of Academy of Sciences of Belarus], 1995, vol. 39, no. 3, pp. 109–113 (In Russian).

Информация об авторах

Андрижиевский Анатолий Альгертович – доктор технических наук, профессор кафедры энергосбережения, гидравлики и теплотехники. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова 13а, Республика Беларусь). E-mail: aaandri@mail.ru

Трифонов Александр Георгиевич – доктор технических наук, заместитель генерального директора ГНУ «Объединенный институт энергетических и ядерных исследований – Сосны» Национальной академии наук Беларуси (220109, г. Минск, ул. акад. А. К. Красина, 99, Республика Беларусь). E-mail: tral@list.ru

Кулик Лилия Сергеевна – младший научный сотрудник. ГНУ «Объединенный институт энергетических и ядерных исследований – Сосны» Национальной академии наук Беларуси (220109, г. Минск, ул. акад. А. К. Красина, 99, Республика Беларусь). E-mail: knopka.lija@mail.ru

Information about the authors

Andrizhievsky Anatoliy Al'gertovich – DSc (Engineering), Professor, the Department of Energy-saving, Hydraulics and Heat Engineering. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: aaandri@mail.ru

Trifonov Alexander Georgievich – DSc (Engineering), Deputy General Director. SSI “Joint Institute for Power and Nuclear Research – Sosny” of the National Academy of Sciences of Belarus (99, ac. A. K. Krasin str., 220109, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: tral@list.ru

Kulik Liliya Sergeevna – Junior researcher. SSI “Joint Institute for Power and Nuclear Research – Sosny” of the National Academy of Sciences of Belarus (99, ac. A. K. Krasin str., 220109, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: knopka.lija@mail.ru

Поступила 29.02.2016